

## 다축 제어 시뮬레이터의 동특성 해석에 관한 연구

정상화\*(조선대 기계공학부), 박용래, 류신호, 김현욱, 나윤철(조선대 대학원 기계공학과)

### A Study on the Dynamic Characteristic Analysis of Multi-axis Simulator

S. H. Jeong(Mech. Eng. Dept., CSU), Y. R. Park, S. H. Ryu, H. U. Kim, U. C. Na(Grad. Mech. Eng. Dept., CSU)

#### ABSTRACT

Test in the development of vehicle consist of driving test and simulation test. The last one has many advantages. It can reduce time and cost during development, can overcome the spacial and environmental limitation, and can provides repeatabilities of similar experiments and various data. In these reason, the simulation test is used more for analysis and development of new vehicle. In this research the result of kinematic analysis on multi-axis simulator is compared with the simulated result using dynamic analysis program, ADAMS, and the maximum stress and strain are analyzed for the safety of link and specifications of optimal design using finite element method

**Key Words** · Multi-axis simulator(다축 제어 시뮬레이터), Road simulation test(로드 시뮬레이션 시험), Stewart platform(스튜어트 플랫폼), Parallel link mechanism(병렬 링크 메카니즘), Dummy wheel(더미 휠)

#### 1. 서론

신제품 차량개발과정에 있어서 실험실 제한실험은 주어진 실험실내의 공간에서 차량의 주행상태를 반복, 제한함으로써 많은 시간의 절감과 공간 및 환경의 제약에서 벗어날 수 있으며, 실험의 지속적 제한성과 실험자가 실험중인 차량을 수시로 관찰, 분석할 수 있어 문제점의 조기 확인이 가능한 장점이 있다. 이런 이유로 많은 선진 자동차사에서는 다축 제어 시뮬레이터를 이용한 실험실 제한실험을 활성화하여 차량개발기간의 단축은 물론 높은 신뢰성을 가진 고품질 자동차의 개발에 활용하고 있는 실정이나 아직까지 국내에서는 수입에만 의존하고 있다<sup>1)</sup>.

본 논문에서는 다축 제어 시뮬레이터를 설계하고 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 시뮬레이션하여 다축 제어 시뮬레이터에 요구되는 운동범위와 시뮬레이션한 결과에 의해 유추된 운동범위를 비교하였으며, 링크부의 안정성 평가 및 최적모델의 사양을 결정하기 위해 FEM(finite element method)을 이용하여 최대 응력 및 최대 변형량을 해석하였다.

#### 2. 다축 제어 시뮬레이터의 설계사양

차량이 주행중에 외부로부터 받는 요소들은 요철과 같은 노면의 불규칙성으로 나타나는 연직방향(y축)의 하중, 운전자의 가속속에 의한 차량의 전후방향(x축)으로 발생하는 하중, 차량의 선회시나 들기등을 타이어의 측면이 통과할 때 횡방향(z축)으로 발생하는 하중등으로 분류할 수 있다<sup>2)</sup>.

휠에 작용하는 외부요소를 Fig 1에 나타내었다

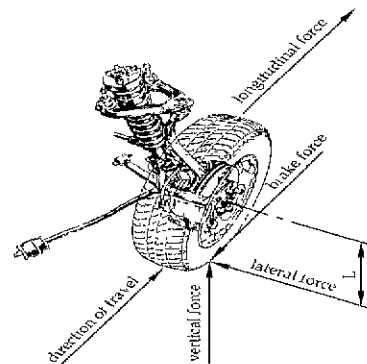


Fig. 1 Loads acting on a wheel

다축 제어 시뮬레이터에서 시험용 차량에 실제

입력되는 로드 데이터는 연직방향  $\pm 80\text{mm}$ , 전후 및 횡방향  $\pm 8\text{mm}$  정도이다<sup>2)</sup>.

이러한 입력데이터를 링크구조에 충분히 재현하기 위해 포드사의 3축 시뮬레이터는 연직방향  $\pm 250\text{mm}$ , 전후 및 횡방향  $\pm 100\text{mm}$ 의 최대 필요거동행정을 가지고 있다<sup>3)</sup>. 또한, 다축 제어 시뮬레이터와 같이 D. Stewart가 개발한 스텐워드 플랫폼 구조를 기본구조로 하는 주행 시뮬레이터(driving simulator)에 입력되는 로드 데이터의 최대 변화량은 연직방향, 전후방향 및 횡방향에서  $\pm 400\text{mm} \sim \pm 1880\text{mm}$ 의 행정을 가지고 있다<sup>4-5)</sup>.

본 논문에서는 개발하고자 하는 다축 제어 시뮬레이터에서 로드 데이터를 이용하여 실험실에서 재현이 가능하도록 로드 데이터의 여유행정을 고려하여 최대 거동행정 범위를 연직방향은  $\pm 180\text{mm}$ , 전후방향  $\pm 100\text{mm}$ , 그리고 횡방향은  $\pm 40\text{mm}$ 로 설정하고, 이 변위를 기초로 하여 다축 제어 시뮬레이터 링크부를 설계하였다.

Table 1 Requirements and specification of the multi-axis simulator

| Description      |                | Requirements & Specification   |
|------------------|----------------|--|
| Actuator         | Max stroke     | $\pm 80\text{mm}$  |
|                  | Neutral length | 856.2mm  |
|                  | Static force   | $\pm 750 \text{ kgf}$ (X,Z axle)<br>$\pm 1,000 \text{ kgf}$ (Y axle)   |
|                  | Dvnmatic force | $\pm 1,100 \text{ kgf}$ (X,Z axle)<br>$\pm 1,450 \text{ kgf}$ (Y axle) |
| Max dynamic disp | X motion       | $\pm 100\text{mm}$   |
|                  | Y motion       | $\pm 180\text{mm}$   |
|                  | Z motion       | $\pm 40\text{mm}$  |

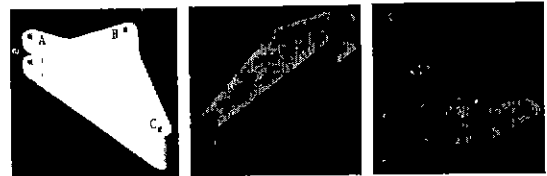
설계하고자 하는 다축 제어 시뮬레이터의 요구 사양인 최대 거동행정 범위와 다축 제어 시뮬레이터에 사용되는 액츄에이터의 성능을 Table 1에 나타내었다. 액츄에이터는 국내에서 주로 사용하는 보편화된 사양을 기본적으로 채택하여 다축 제어 시뮬레이터를 설계하였다.

### 3. 다축 제어 시뮬레이터 링크부의 구동영역 해석

#### 3.1 다축 제어 시뮬레이터의 기본 설계

다축 제어 시뮬레이터에서 액츄에이터를 더미 휠에 직접 연결시킬 때 링크기구의 크기가 커지고 축간 간섭이 커지는 문제점이 발생하는데, 이를 더미 휠과 액츄에이터 사이에 각 축마다 링크와 요동절의

설치하여 해결하였다. 다축 제어 시뮬레이터 링크부의 링크길이는 전반적인 링크들의 구동영역과 부수적인 장치들의 위치를 고려하여 연직축 1020mm, 횡축 1050mm, 그리고 좌우축 1550mm로 하였다.



(a) Z-axis (b) X-axis (c) Y-axis

Fig. 2 Bell crank

정적 행정이  $\pm 80\text{mm}$ 인 각 축 액츄에이터의 행정을 최대 필요 거동 행정까지 변환하기 위하여 연직축에는 액츄에이터 변위행정 대 변환되는 요동절의 변위행정 비가 2:1, 전후·횡축에는 1.375:1인 각각의 요동절을 설계하였다.

Fig. 2에서 (a)는 설계된 횡축 요동절이며, (b)는 전후축 요동절, (c)는 연직축 요동절이다. 각 요동절들의 A부분은 각 축의 링크들이 볼 조인트로 연결되는 부분이며, 액츄에이터 구동시 요동절의 최대 필요행정까지 변환되는 요동절의 말단부분이다. B부분은 구동 액츄에이터가 볼 조인트로 연결되는 부분이고, C부분은 베이스의 고정된 지점에 핀 조인트로 고정되는 부분이다.

#### 3.2 다축 제어 시뮬레이터의 구동영역 해석

유도되어진 요구조건을 바탕으로 다축 제어 시뮬레이터의 링크부를 설계하였으며, 동역학 해석 프로그램인 ADAMS로 시뮬레이션하였다. Fig 3은 ADAMS에서의 다축 제어 시뮬레이터 링크부의 동특성 해석과정을 나타낸 것이다.

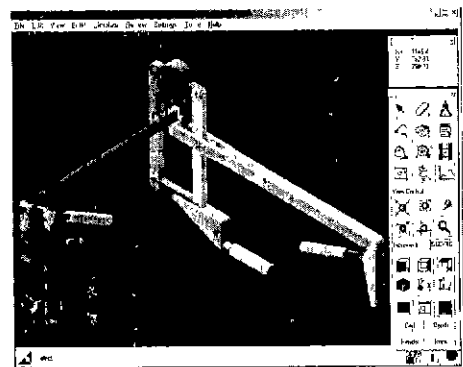


Fig 3 ADAMS simulation of multi-axis simulator

Fig. 4는 연직(Y축) 액츄에이터가 최대 변위인  $\pm 80\text{mm}$ 의 정현파형으로 구동할 때 더미 휠의 구동영역을 나타낸 것이며, Fig. 5는 전후(X축) 액츄에이터가 최대 변위인  $\pm 80\text{mm}$ 의 정현파형으로 구동할 때 더미 휠의 구동영역을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 6은 횡축(Z축) 액츄에이터가 Fig. 4와 같은 조건으로 구동할 때 더미 휠의 구동영역을 나타낸 것인데, 점선은 x좌표 변위량이며, 일점쇄선은 y좌표, 실선은 z좌표 변위량을 표시한 것이다. 각 그래프에서 x축은 정현파의 입력시간을 나타내며, y축은 출력되는 변위량을 나타낸다

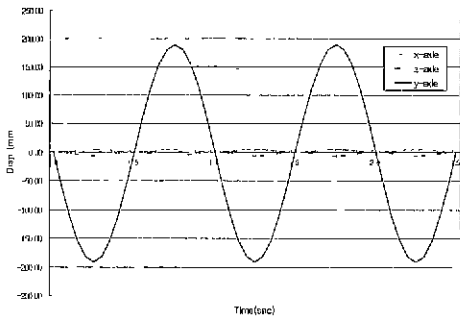


Fig. 4 Displacement of dummy wheel at operating Y-axis actuator

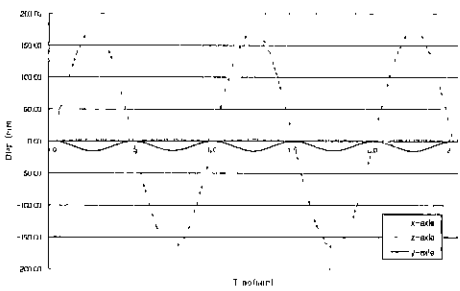


Fig. 5 Displacement of dummy wheel at operating X-axis actuator

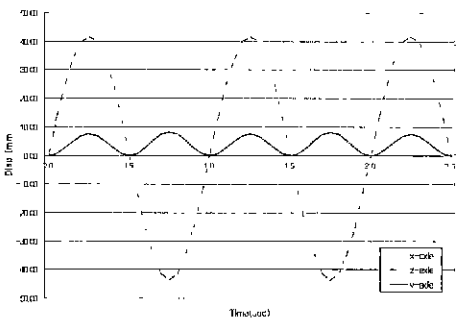


Fig. 6 Displacement of dummy wheel at operating Z-axis actuator

ADAMS에서 연직축 액츄에이터만 최대변위인  $\pm 80\text{mm}$ 로 구동시 더미 휠이 연직방향으로  $\pm 190.13\text{mm}$ , 전후 액츄에이터만 구동시 더미 휠이 전후방향으로  $\pm 169.37\text{mm}$ , 횡축 액츄에이터만 구동시 더미 휠이 횡방향으로  $\pm 42.65\text{mm}$ 의 구동 영역을 나타냈는데, 이는 설계하고자 하는 다축 제어 시뮬레이터의 최대 거동 범위인 연직방향  $\pm 180\text{mm}$ , 그리고 전후방향  $\pm 100\text{mm}$ , 및 횡방향  $\pm 40\text{mm}$ 를 만족함을 알 수 있었다. 또한, 실제 입력되는 로드 데이터의 조건인 연직방향  $\pm 80\text{mm}$ , 전후 및 횡방향  $\pm 8\text{mm}$ 를 충분히 구현할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 다축 제어 시뮬레이터 링크부의 FEM 해석

다축 제어 시뮬레이터의 링크부의 안정성 평가 및 최적모델의 사양을 결정하기 위해 FEM(finite element method)을 이용하여 최대 응력 및 최대 변형률을 해석하였다 링크부의 재료는 고강도 알루미늄 합금 2024-T3을 사용하였다. Table 2는 알루미늄 합금 2024-T3의 물성치를 나타낸다

Table 2 Monotonic properties of Aluminum Alloy 2024-T3

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Mass Density            | $2.77\text{e-}6 \text{ kg/mm}^3$            |
| Elastic Module          | $7.45\text{e}+3 \text{ kg/mm}^2$            |
| Poisson's Ratio         | 0.33  |
| Yield Stress            | $35.2 \text{ kg/mm}^2$                      |
| Ultimate Tensile Stress | $49.2 \text{ kg/mm}^2$                      |
| Specific Heat           | $9.81\text{e}+4 \text{ kg/mm}^3/\text{kgK}$ |
| Thermal Conductivity    | $19.4 \text{ kg/mm}^3/\text{sec mm}$        |
| Thermal Coeff.          | $2.25\text{e-}5 \text{ mm/mmK}$             |

다축 제어 시뮬레이터의 경계조건과 하중조건을 구하기 위해 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하였다. 경계조건은 하중조건으로 다축 시뮬레이터에 각 액츄에이터의 동적 최대 하중을 주어 얻은 각 요동절과 링크들의 작용하중으로 하였다.

Fig. 9는 각 요동절과 링크들의 모델링과 FEM해석과정을 보여주고 있다.

다축 제어 시뮬레이터 링크부의 모델링은 MDT(Mechanical desktop)를 이용하였으며, FEM해석은 ADAMS에서 구한 경계조건을 바탕으로 Working Model 4D 프로그램 내에 있는 NASTRAN 해석 모델을 이용하였다.

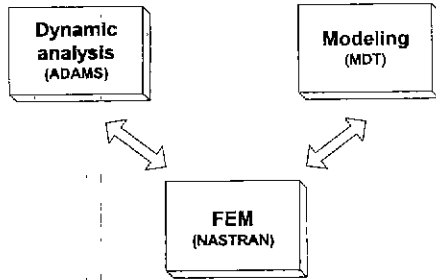
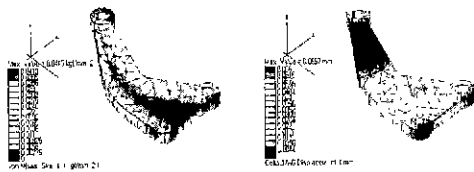


Fig 9 Process of modeling, dynamic and FEM analysis



(a) Von-mises stress (b) Maximum displacement

Fig. 10 Process of FEM analysis at y-axle bell crank

Fig. 10은 연직 요동절을 Working Model 4D에서 FEM 해석하는 과정을 보여주고 있다.

FEM 해석으로 다축 제어 시뮬레이터에 각 액츄에이터의 동적 최대 하중을 동시에 주었을 때, 연직 요동절에서는 최대 응력이  $0.0415 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ 이고, 최대 변형량은  $0.0667 \text{ mm}$ 이다.

Table 3은 다축 제어 시뮬레이터의 링크부를 FEM 해석을 통해 구한 최대 응력과 최대 변형량의 결과값이다.

Table 3 Max. stress and displacement at FEM analysis

| Linkage (multi-axis simulator) | Max. stress ( $\text{kg}_f/\text{mm}^2$ ) | Max displacement (mm) |
|--------------------------------|---|-----------------------|
| x-axle bell crank              | 0.107                                     | 0.0132                |
| y-axle bell crank              | 0.0415                                    | 0.0667                |
| z-axle bell crank              | 0.0506                                    | 0.00435               |
| Left loading arm               | 0.00307                                   | 0.00454               |
| Right loading arm              | 0.014                                     | 0.0641                |
| Middle loading arm support     | 0.00804                                   | 0.0037                |
| Bellow loading arm support     | 0.00954                                   | 0.00589               |
| x-axle link                    | 0.0137                                    | 0.162                 |
| z-axle link                    | 0.00745                                   | 0.0223                |

## 5. 결론

본 연구에서는 설계한 다축 제어 시뮬레이터의 링크부를 동역학적 특성을 파악하기 위해 ADAMS를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 링크부의 안정성 평가 및 최적모델의 사양을 결정하기 위해 FEM 해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용한 시뮬레이션 결과는 다축 제어 시뮬레이터에서 요구되는 최대 거동범위인 연직축  $\pm 180\text{mm}$ , 전후축  $\pm 100\text{mm}$ , 그리고 횡축  $\pm 40\text{mm}$ 를 만족하였다

(2) 다축 제어 시뮬레이터 링크부의 안정성 평가 및 최적모델의 사양을 결정하기 위해 고강도 알루미늄 합금 2024-T3을 사용하여 FEM 해석을 한 결과, 링크부에서의 최대 변형량은  $0.162 \text{ mm}$ 이며 최대 응력은  $0.107 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ 으로 재질의 항복 강도인  $352 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ 이내에 있음을 확인하였다.

## 참고 문헌

- 1) 김영일, "4 Channel Road Simulator", Asia Technical Review. 13:63-74, 1992
- 2) 김규하 "車軸 시뮬레이터용 6軸 링크機構의 干涉 最小化 設計", 전남대학교 석사 학위논문, 2000.
- 3) K. D. Zell, "Overview of Advanced Road Simulation Techniques", SAE Paper 740946, 1974.
- 4) 최규제, 최성진, 노기환, 유영면, "고성능 Driving Simulator의 기술적 조사 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp 242-248, 1997.
- 5) David H. Weir and Allen J. Clark, "A Survey of Mid-Level Driving Simulators", SAE Paper 950172, 1995.
- 6) 김홍섭, 신천우, "차량 주행 상태의 LAB. 재현 실험 방법 II", Kia Technical Review, Vol 11, pp 135-144, 1989